

TRANSISTOR

Publication number: JP2002076324

Publication date: 2002-03-15

Inventor: WATANABE HIROYUKI; SHIMIZU MASAOKI; MANABE TSUTOMU

Applicant: FUJI XEROX CO LTD

Classification:



- international: H01L21/28; H01L21/337; H01L21/338; H01L29/06; H01L29/423; H01L29/43; H01L29/49; H01L29/78; H01L29/786; H01L29/808; H01L29/812; H01L51/30; H01L21/02; H01L29/02; H01L29/40; H01L29/66; H01L51/05; (IPC1-7): H01L29/06; H01L21/28; H01L21/337; H01L21/338; H01L29/43; H01L29/78; H01L29/786; H01L29/808; H01L29/812

- European: H01L51/05B; H01L51/00M4D; Y01N4/00

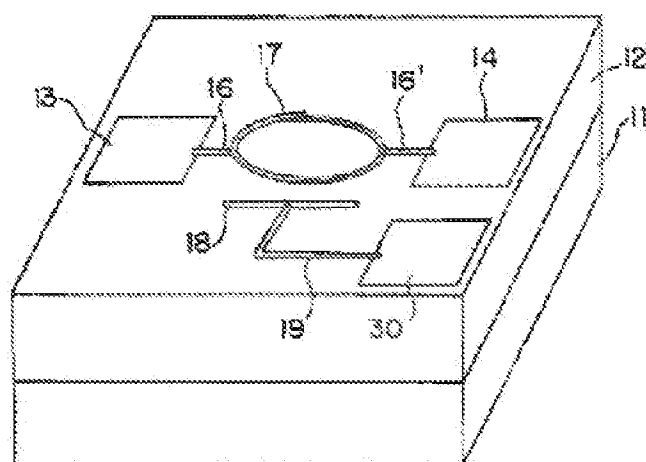
Application number: JP20000263943 20000831

Priority number(s): JP20000263943 20000831

Also published as:

 US6590231 (B2) US2002024099 (A1)[Report a data error here](#)**Abstract of JP2002076324**

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide the transistor of a nanometer size which can be operated at high speed and operates at a room temperature by using a carbon nanotube for a semiconductor element. **SOLUTION:** In the transistor, carbon nanotube rings 16 and 17 having semiconductor characteristics are used as semiconductor materials or carbon nanotube rings 18 and 19 having conductive or semiconductor characteristics as electrode materials.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

(19)日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11)特許出願公開番号

特開2002-76324

(P2002-76324A)

(43)公開日 平成14年3月15日(2002.3.15)

(51)Int.Cl. ⁷	識別記号	FI	ページ(参考)
H01L 29/06		H01L 29/06	4M104
21/28	301	21/28	301Z 5F040
			301B 5F102
29/43		29/62	C 5F110
29/78		29/78	301X

審査請求 未請求 請求項の数18 O.L (全 11 頁) 最終頁に続く

(21)出願番号 特願2000-263943(P2000-263943)

(22)出願日 平成12年8月31日(2000.8.31)

(71)出願人 000065496

富士ゼロックス株式会社

東京都港区赤坂二丁目17番22号

(72)発明者 渡邊 浩之

神奈川県南足柄市竹松1600番地 富士ゼロックス株式会社内

(72)発明者 清水 正昭

神奈川県足柄上郡中井町境430 グリーン
テクノカい 富士ゼロックス株式会社内

(74)代理人 100079049

弁理士 中島 淳 (外3名)

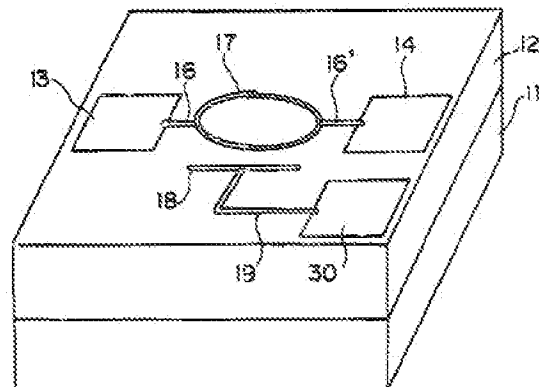
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 トランジスタ

(57)【要約】 (修正有)

【課題】 半導体素子にカーボンナノチューブを用いることで、高速動作が可能で、室温で動作するナノメーターサイズのトランジスタを提供すること。

【解決手段】 半導体特性を有するカーボンナノチューブリング16、17を半導体材料として、あるいは、導電性または半導体特性を有するカーボンナノチューブリング18、19を電極材として、用いることを特徴とするトランジスタである。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 半導体特性を有するカーボンナノチューブリングを半導体材料として用いることを特徴とするトランジスタ。

【請求項2】 前記カーボンナノチューブリングに2つの電極を接続し、該カーボンナノチューブリングの近傍かつ離間された位置に制御電極を設けてなることを特徴とする請求項1に記載のトランジスタ。

【請求項3】 前記カーボンナノチューブリングに接続される2つの電極の電極材料として、導電性を有するカーボンナノチューブを用いることを特徴とする請求項2に記載のトランジスタ。

【請求項4】 前記導電性を有するカーボンナノチューブの直径が、1 nm以上1 μ m以下であることを特徴とする請求項3に記載のトランジスタ。

【請求項5】 請求項2～4のいずれか1に記載のトランジスタであって、前記カーボンナノチューブリングが、絶縁性薄膜表面に、リング面が当接するように載置され、前記制御電極が、前記絶縁性薄膜の前記カーボンナノチューブリングが載置された面の背面側に設けられてなることを特徴とするトランジスタ。

【請求項6】 請求項2～4のいずれか1に記載のトランジスタであって、前記カーボンナノチューブリングが、絶縁性基板表面に、リング面が当接するように載置され、前記制御電極が、前記絶縁性基板表面の前記カーボンナノチューブリングの近傍かつ離間された位置に設けられてなることを特徴とするトランジスタ。

【請求項7】 請求項2～4のいずれか1に記載のトランジスタであって、前記カーボンナノチューブリングが、絶縁性基板表面に、リング面が当接するように載置され、制御電極が、前記絶縁性基板表面に載置された前記カーボンナノチューブリングのさらに上部に設けられてなることを特徴とするトランジスタ。

【請求項8】 導電性または半導体特性を有するカーボンナノチューブリングを電極材として用いることを特徴とするトランジスタ。

【請求項9】 請求項8に記載のトランジスタであって、前記カーボンナノチューブリングが、半導体基板表面に、リング面が当接するように載置され、制御電極を構成し、前記半導体基板表面の、前記カーボンナノチューブリングの開口部から突出する部位に、1の電極を設け、さらに、前記半導体基板表面の、前記カーボンナノチューブリングの近傍かつ離間された位置に他の電極を設けてなることを特徴とするトランジスタ。

【請求項10】 制御電極としてのカーボンナノチュー

ブリングに、接続配線を介して端子を設けてなる請求項9に記載のトランジスタであって、前記接続配線として、導電性のカーボンナノチューブを用いることを特徴とするトランジスタ。

【請求項11】 前記導電性を有するカーボンナノチューブの直径が、1 nm以上1 μ m以下であることを特徴とする請求項10に記載のトランジスタ。

【請求項12】 前記半導体基板表面に設けられる、前記1の電極および/または他の電極と、前記半導体基板表面と、の接合抵抗が、1 m Ω 以上100 k Ω 以下であることを特徴とする請求項9～11のいずれか1に記載のトランジスタ。

【請求項13】 請求項9～12のいずれか1に記載のトランジスタであって、半導体基板がシリコン基板であり、該シリコン基板の表面のダングリングボンドが水素末端処理されていることを特徴とするトランジスタ。

【請求項14】 前記半導体特性もしくは導電性を有するカーボンナノチューブリングが、単一壁のカーボンナノチューブリング、もしくはその集合体であることを特徴とする請求項1～13のいずれか1に記載のトランジスタ。

【請求項15】 前記半導体特性もしくは導電性を有するカーボンナノチューブリングのリング外径が、10 nm以上10 μ m以下であることを特徴とする請求項1～14のいずれか1に記載のトランジスタ。

【請求項16】 前記半導体特性もしくは導電性を有するカーボンナノチューブリングのチューブ部位の太さが、1 nm以上1 μ m以下であることを特徴とする請求項1～15のいずれか1に記載のトランジスタ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、電子素子に適用できるトランジスタに関し、詳しくは、室温で動作するナノメートルサイズのトランジスタに関する。

【0002】

【従来の技術】近年、フラーレンやカーボンナノチューブが発見されるに至って、それまで知られていたグラファイト、アモルファスカーボン、ダイヤモンドとは異なる新しい炭素物質として、注目されるようになった。その理由は、フラーレンやカーボンナノチューブが、それまでの炭素物質とは異なる特異な電子物性を示すためである。

【0003】例えば、 C_{60} や C_{70} に代表されるフラーレンは、多数の炭素原子が球状の籠型に配置して一つの分子を構成し、ベンゼン等の有機溶媒にも溶ける。フラーレンは、 C_{60} や C_{70} 以外にも多数の種類を有し、超伝導体や半導体としての性質を示す。また、フラーレンは、光官能効果が高く、電子写真感光材料としての応用も考えられている。さらに、フラーレンには、内部に異種の元素を閉じ込めたり、外部に多種の化学官能基を付与さ

せることで、機能性材料として有効な物性を発現させることもできる。

【0004】カーボンナノチューブは、フラーレンと同様、炭素のみを構成元素とした新しい材料であるが、電子放出源、半導体材料、水素貯蔵材料等の機能が発見されている。特に、わずかに原子配列の仕方（カイラリティ）が変化することで、半導体にも、導体にもなりうることから、ナノメーターサイズのスイッチング素子として電子工業の各分野における活用が期待されている。

【0005】一方、電子素子の主力であるシリコンデバイス、高度な微細加工技術の進展で、電界効果トランジスター（FET）のゲート電極幅も約0.1 μm にまで小型化され、集積度の向上から、動作速度が1Gbit程度のメモリーも試作されている。シリコンデバイスの最も有利な点は、酸化シリコンを絶縁体として用いた場合、シリコンと酸化シリコンとの間の界面準位が著しく低く、酸化MOS（金属酸化物半導体）トランジスターを容易に構成できる点にある。占有面積が小さく、消費電力の低い当該MOSトランジスターを論理回路に用いることで、素子の高集積化が可能になった。また、材料であるシリコンは、ハロゲンプロセスにより、極めて高純度なものが得られ、結晶成長法もチョコラルスキー法により、口径30cm以上の半導体ウェハーが生産できるため、素子の生産性も極めて高い。

【0006】ただし、シリコンはキャリア移動度が低く、スイッチング速度に限界がある。その点を解決したのが、GaAs電界効果トランジスタ（GaAs-FET）やGeSiバイポーラトランジスタである。GaAsのキャリア移動度はシリコンより高く、GaAs-FETはSiトランジスタよりはるかに高い動作速度を有している。また、GeSiバイポーラトランジスタは、動作速度がGaAs-FETと同等ながら、デバイス単価が安いので、携帯端末等に多用化されつつある。

【0007】さらに、数10GHzのスイッチング速度を実現するために考案されたのが、電子やホールを二次元に閉じ込めた二次元電子ガスによるHEMT（高移動度トランジスタ）である。現在、これらのデバイスは、移動体通信を含め、数GHz以上の高周波通信には、欠くことのできない電子デバイスとなっている。

【0008】現在、さらなる動作速度を期待されているのが、量子細線や量子ドットのような低次元構造構造をもつ電子デバイスである。電子やホールを1次元（線）もしくは0次元（ドット）に閉じ込めることで、超高速動作が可能になると考えられている。こうした半導体素子の低次元構造は、デバイスサイズの限界を打破するだけではなく、スイッチングデバイスの超高速動作を実現する上で重要な技術と期待されている。

【0009】特に、カーボンナノチューブは、直径が数nmなので、その電気伝導機構は一次元に等しく、低次元電導物質として注目されている。そして、単一壁カー

ボンナノチューブは、半導体特性を示すものもあるので、カーボンナノチューブによるナノメーターサイズのトランジスタを構成できる潜在能力を持っている。現在、常温でカーボンナノチューブの整流特性が確認されており、さらに、室温での一次元量子状態（ラッティンジャー液体状態）も実験的に示唆されている。したがって、常温におけるバリスティック伝導機構を応用することで、数THzの動作速度をもつカーボンナノチューブのスイッチングデバイスが実現可能であると考えられている。

【0010】また、シリコンデバイスの加工プロセスは、これ以上の微細化を行うにあたって多く問題を抱えており、技術的限界に近づいている。特に、露光技術において、光学限界である線幅0.1 μm 以下の技術は、F₂レーザー露光法や電子線ビーム露光法等が提案されているものの、酸化膜形成等の課題が多い。現在、0.1 μm 以下のサイズで動作するデバイスを実現する技術は様々なものが考案され、開発されているものの、製造技術として課題が多い。

【0011】したがって、カーボンナノチューブによる電子デバイスの製造技術が提供されれば、高速度動作のみならず、現在、限界に近づいているシリコンデバイスの加工プロセスに代替可能なデバイスを提案できると期待されている。

【0012】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、アーク放電法、レーザーアブレーション法等で得られたカーボンナノチューブは、太さはほぼ一定でも、その長さが様々で、数10nmから数mmの広範囲に渡り、しかも、その長さの制御が困難で、素子を構成する際に必要なサイズのカーボンナノチューブを得る技術は、現在までのところない。従来の技術では、偶発的に得られたサイズのカーボンナノチューブを用いているに過ぎず、カーボンナノチューブを実験室的に利用することができても、工業的に電子デバイス材料として利用することは困難であった。

【0013】また、カーボンナノチューブと金属製の電極を接続する場合、接触抵抗が高く、高速の動作には不利であった。

【0014】そこで、本発明の目的は、半導体素子にカーボンナノチューブを用いることで、高速動作が可能で、室温で動作するナノメーターサイズのトランジスタを提供することにある。

【0015】

【課題を解決するための手段】単一壁カーボンナノチューブを超音波で処理すると、微小なリング、すなわち本発明に言うカーボンナノチューブリングを形成することが知られている。本発明では、このカーボンナノチューブリングを用いて電子デバイスとしてのトランジスタを構成することを特徴とするものである。

【0016】上記目的は、以下の本発明により達成される。すなわち本発明は、

<1> 半導体特性を有するカーボンナノチューブリングを半導体材料として用いることを特徴とするトランジスタである、

<2> 前記カーボンナノチューブリングに2つの電極を接続し、該カーボンナノチューブリングの近傍かつ離間された位置に制御電極を設けてなることを特徴とする<1>に記載のトランジスタである、

【0017】<3> 前記カーボンナノチューブリングに接続される2つの電極の電極材料として、導電性を有するカーボンナノチューブを用いること特徴とする<2>に記載のトランジスタである、

<4> 前記導電性を有するカーボンナノチューブの直径が、1 nm以上1 μ m以下であることを特徴とする<3>に記載のトランジスタである、

【0018】<5> <2>～<4>のいずれか1に記載のトランジスタであって、前記カーボンナノチューブリングが、絶縁性薄膜表面に、リング面が当接するように載置され、前記制御電極が、前記絶縁性薄膜の前記カーボンナノチューブリングが載置された面の背面側に設けられてなる、ことを特徴とするトランジスタである、

【0019】<6> <2>～<4>のいずれか1に記載のトランジスタであって、前記カーボンナノチューブリングが、絶縁性基板表面に、リング面が当接するように載置され、前記制御電極が、前記絶縁性基板表面の前記カーボンナノチューブリングの近傍かつ離間された位置に設けられてなる、ことを特徴とするトランジスタである、

【0020】<7> <2>～<4>のいずれか1に記載のトランジスタであって、前記カーボンナノチューブリングが、絶縁性基板表面に、リング面が当接するように載置され、制御電極が、前記絶縁性基板表面に載置された前記カーボンナノチューブリングのさらに上部に設けられてなる、ことを特徴とするトランジスタである、

【0021】<8> 導電性または半導体特性を有するカーボンナノチューブリングを電極材として用いることを特徴とするトランジスタである、

<9> <8>に記載のトランジスタであって、前記カーボンナノチューブリングが、半導体基板表面に、リング面が当接するように載置され、制御電極を構成し、前記半導体基板表面の、前記カーボンナノチューブリングの開口部から表出する部位に、1の電極を設け、さらに、前記半導体基板表面の、前記カーボンナノチューブリングの近傍かつ離間された位置に他の電極を設けてなる、ことを特徴とするトランジスタである、

【0022】<10> 制御電極としてのカーボンナノチューブリングに、接続配線を介して端子を設けてなる<9>に記載のトランジスタであって、前記接続配線として、導電性のカーボンナノチューブを用いること特徴

とするトランジスタである、

<11> 前記導電性を有するカーボンナノチューブの直径が、1 nm以上1 μ m以下であることを特徴とする<10>に記載のトランジスタである、

<12> 前記半導体基板表面に設けられる、前記1の電極および/または他の電極と、前記半導体基板表面と、の接合抵抗が、1 m Ω 以上100 k Ω 以下であることを特徴とする<9>～<11>のいずれか1に記載のトランジスタである、

【0023】<13> <9>～<12>のいずれか1に記載のトランジスタであって、半導体基板がシリコン基板であり、該シリコン基板の表面のダングリングボンドが水素末端処理されていることを特徴とするトランジスタである、

<14> 前記半導体特性もしくは導電性を有するカーボンナノチューブリングが、単一壁のカーボンナノチューブリング、もしくはその集合体であることを特徴とする<1>～<13>のいずれか1に記載のトランジスタである、

【0024】<15> 前記半導体特性もしくは導電性を有するカーボンナノチューブリングのリング外径が、10 nm以上10 μ m以下であることを特徴とする<1>～<14>のいずれか1に記載のトランジスタである、

<16> 前記半導体特性もしくは導電性を有するカーボンナノチューブリングのチューブ部位の太さが、1 nm以上1 μ m以下であることを特徴とする<1>～<15>のいずれか1に記載のトランジスタである、

【0025】本発明では、カーボンナノチューブがリング状に形成されたカーボンナノチューブリングを用いることで、安定した品質のトランジスタを形成することに成功している。これは、カーボンナノチューブからカーボンナノチューブリングを作製した際、得られるカーボンナノチューブリングの大きさ（リング外径）のばらつきが少なく、さらに得られたカーボンナノチューブリングを大きさごとに分別することが可能であり、安定した大きさのカーボンナノチューブリングを半導体材料あるいは電極材として用いることができるためである、

【0026】

【発明の実施の形態】本発明のトランジスタとしては、半導体特性を有するカーボンナノチューブリングを半導体材料として用いること特徴とするものと、導電性または半導体特性を有するカーボンナノチューブリングを電極材として用いること特徴とするものと2つの形態がある、

【0027】前者は、例えば制御電極（ゲート電極）としてのn型半導体基板等の基板と、p型の半導体特性を有するカーボンナノチューブリングと、がリング面が当接するように電気的に絶縁された状態で配置され、前記カーボンナノチューブリングに2つの電極を接続し、当

該電極をソース電極およびドレイン電極とすることで、ソース電極とドレイン電極に流れる電流、もしくはソース電極とドレイン電極に印加される電圧をゲート電極電位で変化させて制御し、能動的電子素子として機能する。なお、制御電極（ゲート電極）は、n型半導体基板等の基板に限らず、前記カーボンナノチューブリングの近傍かつ離隔された位置に配されたものであれば、本発明において問題ない。また、基板としてn型半導体基板を用いる場合、具体的な材料としては、単結晶シリコン、ガリウム砒素、インジウム燐、窒化ガリウム、ダイヤモンド等が挙げられる。

【0028】後者は、例えばn型半導体基板と、導電性またはp型半導体特性を有するカーボンナノチューブリングと、がリング面が当接するようにショットキー接続された状態で配置され制御電極（ゲート電極）として機能し、前記半導体基板表面の、前記カーボンナノチューブリングの開口部から表出する部位に、1の電極（ドレイン電極またはソース電極）がオーム性接続され、さらに、前記半導体基板表面の、前記カーボンナノチューブリングの近傍かつ離隔された位置に他の電極（ドレイン電極またはソース電極であって、前記1の電極と異なるもの）がオーム性接続されたものである。ゲート電極としてのカーボンナノチューブリングは、該カーボンナノチューブリングの開口部内に配された1の電極と電気的に独立であり、当該1の電極と、前記カーボンナノチューブリングの近傍かつ離隔された位置に配された他の電極との間に流れる電流、もしくは両電極間に印加される電圧を、ゲート電極電位で変化させることで制御し、能動的電子素子として機能する。

【0029】一般的にカーボンナノチューブの基本構造は、炭素の6員環より構成され、通常のグラファイトが閉じて中空の管になった構造をしている。カーボンナノチューブは、単一壁と多重壁の二種類に大別され、単一壁カーボンナノチューブは、一般にその太さ（直径）が1nmから10nmである。一方、多重壁カーボンナノチューブはその太さ（直径）も様々で、数100nmに達するものもある。前述のように、単一壁カーボンナノチューブは半導体特性と示すものと導電性を示すものの二種類が存在し、半導体特性と有するものは、p型であると推定されている。後述の実施例1においては、半導体特性を有する単一壁カーボンナノチューブがp型であることが証明されている。

【0030】前記カーボンナノチューブは、原料である単一壁カーボンナノチューブから以下のようにして製造することができる。まず、原料である単一壁カーボンナノチューブをアーク放電法もしくは化学気相法で作製する。その後、得られた単一壁カーボンナノチューブをメタノール中で超音波処理する。このとき、メタノール中に適当な界面活性剤を数%の濃度で混ぜることで、分散特性が向上する。次に、超音波中でカーボンナノチュー

ブは断裂するとともに、環状に変形し、カーボンナノチューブリングが形成される。遠心分離法により、このカーボンナノチューブリングを単離する。得られたカーボンナノチューブリングは、それ自体単独で存在するか、2ないし10本程度のバンドル（束）より構成されている（後者をカーボンナノチューブリングの「集合体」と称する）。また、個々の単一壁カーボンナノチューブは通常、半導体特性を示すならp型と推定されており、半導体特性と導電性とを決定する要因は、カーボンナノチューブのカイラル構造（ねじれ構造）の変化によるという解釈と、カーボンナノチューブの欠陥に起因しているという解釈があるが、詳細は現時点でも不明である。

【0031】なお、カーボンナノチューブの製造方法については、Journal of Physical Chemistry B (volume 103, Number 36, September 9, 1999, p. 7551-7556, R. Martel, H. R. Her and P. Avourisの文献において、p. 7552、左13行から右7行まで）等に詳細に記載されており、本発明において、かかる方法をそのまま適用することができる。本発明ではさらに、カーボンナノチューブリングの大きさを分別するために、R. Martelとは異なり、分散液として硫酸・過酸化水素水溶液を用いず、界面活性剤メタノール溶液を用い、超音波処理の時間と遠心分離条件とを最適化させることが望ましい。処理条件によって、20nmから50nmの範囲で、大きさが均等なカーボンナノチューブリングを得ることができる。

【0032】以下、本発明を、好ましい実施形態を挙げて詳細に説明する。

<第1の実施形態>図1は、本発明のトランジスタの第1の実施形態を示す模式斜視図である。本実施形態は、半導体特性を有するカーボンナノチューブリングを半導体材料として用いた例である。図1に示すように本実施形態のトランジスタは、ゲート電極（制御電極）としてのn型シリコン基板11の一方の表面に、数十nmの厚さの酸化シリコン膜（絶縁性薄膜）12が、他の表面に、Au等の金属電極によるゲート電極端子15が、それぞれ形成されており、酸化シリコン膜12の表面には、カーボンナノチューブリング17が、リング面が当接するように（すなわち、図1に示すように、リングが寝た状態で；以下同様）載置されている。カーボンナノチューブリング17には、その両端に多重壁カーボンナノチューブ16、16'が接続され、ソース電極およびドレイン電極として機能する。このとき、多重壁カーボンナノチューブ16、16'を形成する操作は、走査型プローブ顕微鏡をマニピレータとして用いることが望ましい。多重壁カーボンナノチューブ16、16'の、カーボンナノチューブリング17に接続された側と反対側のそれぞれの端部は、ソース電極端子13および

ドレイン電極端子14と接続されている。

【0033】本実施形態のトランジスタでは、ソース電極端子13とドレイン電極端子14との間に流れる電流もしくは電圧を、ゲート電極端子15の電位を変化させて制御することが可能になる。すなわち、高速動作が可能で、室温で動作するナノメートルサイズのトランジスタとなる。

【0034】カーボンナノチューブリング17に接続される2つの電極の電極材料としては、通常の金属を用いてもよいが、導電性を有するカーボンナノチューブ、特に本実施形態のように多重壁カーボンナノチューブ16、16'を用いることで、カーボンナノチューブリング17とのトンネル接合により、低接触抵抗の電極配線を実現することができる。

【0035】このときのカーボンナノチューブリング17と多重壁カーボンナノチューブ16、16'との接触抵抗としては、 $0\text{ m}\Omega$ 以上 $1\text{ M}\Omega$ 以下であることが好ましく、高速動作に望ましい $1\text{ }\Omega$ 以上 $100\text{ k}\Omega$ 以下であることがより好ましい。多重壁カーボンナノチューブ16、16'の直径としては、 1 nm 以上 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下であることが好ましく、 5 nm 以上 100 nm 以下であることがより好ましい。

【0036】カーボンナノチューブリング17としては、単一壁のカーボンナノチューブリング、もしくはその集合体であることが望ましく、そのリング外径としては、 10 nm 以上 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下であることが好ましく、 15 nm 以上 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下であることがより好ましく、 20 nm 以上 100 nm 以下であることがさらに好ましい。

【0037】また、カーボンナノチューブリング17としては、そのチューブ部位の太さ（カーボンナノチューブ自体の直径）が、 1 nm 以上 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下であることが好ましく、 5 nm 以上 100 nm 以下であることがより好ましい。

【0038】本実施形態において、ゲート電極（制御電極）は、 n 型シリコン基板11を用いているが、導電性あるいは n 型の半導体特性を有する材料であれば、如何なる材料をも用いることができる。すなわち、カーボンナノチューブリング17の近傍かつ離間された位置にゲート電極（制御電極）15が配されるようにすれば、問題ない。また、 n 型の半導体特性を有する材料を用いる場合、 n 型シリコン基板11の代わりに、ガリウム砒素、インジウム砒素、窒化ガリウム、ダイヤモンド等の基板を用いることも可能である。

【0039】カーボンナノチューブリング17とゲート電極（制御電極）との間に配される絶縁性薄膜としては、本実施形態では酸化シリコン膜12を用いているが、勿論本発明においてはこれに限定されず、絶縁性を有する膜であれば、如何なる材料をも採用することができる。本実施形態のように、 n 型シリコン基板11を下

地基板として用いた場合には、その形成が容易である点で、酸化シリコン膜とすることが望ましい。絶縁性薄膜の厚みとしては、所望とするトランジスタの特性にもよるが、一般的には数十 nm であり、具体的には $5\sim 20\text{ nm}$ とすることが望ましい。

【0040】＜第2の実施形態＞図2は、本発明のトランジスタの第2の実施形態を示す模式斜視図である。本実施形態は、導電性または半導体特性を有するカーボンナノチューブリングを電極材として用いた例である。

【0041】図2に示すように本実施形態のトランジスタは、下地としての n 型半導体基板21の一方の表面に、 n^+ 領域を示す n 型不純物層28が形成され、さらにその上に p 型半導体特性を有するカーボンナノチューブリング27が、リング面が当接するように載置され、ゲート電極（制御電極）を構成する。カーボンナノチューブリング27には、導電性を有する多重壁カーボンナノチューブ26の一端が接続され、他端は、 Au 等の金属材料からなるゲート電極端子25と接続されている。また、 n 型半導体基板21表面の、カーボンナノチューブリング27の開口部から表出する部位に、多重壁カーボンナノチューブ29の一端がオーム性接続され、ソース電極（1の電極）22を構成し、他端は、カーボンナノチューブリング27をまたいで、ソース電極端子23と接続されている（ソース電極端子23と n 型半導体基板21とは絶縁されている）。さらに、 n 型半導体基板21の、カーボンナノチューブリング27の近傍かつ離間された位置にドレイン電極（他の電極）24が、オーム性接続されている。

【0042】基板としては、カーボンナノチューブリング27として p 型半導体特性を有するものを用いているため、本実施形態では n 型半導体基板を用いるのが望ましい。基板として最も適しているのはシリコン基板であるが、その他のガリウム砒素、インジウム砒素、窒化ガリウム、ダイヤモンド等を使用することも可能である。シリコン基板を用いた場合、大気中で取り扱うには、シリコン基板表面を安定化させる必要がある。フッ化水素水溶液でシリコン基板を処理すると、シリコン基板表面のダングリングボンド（相手をもたない結合）が H （水素）と結合する。シリコン基板の自然酸化膜厚は約 1 nm 弱なので、例えばリング外径 50 nm 程度のカーボンナノチューブリングを用いるに際しては、こうした下地基板の表面を安定化させることは効果的である。シリコン基板表面を目で安定化させることで、酸化物の影響を低減させ、カーボンナノチューブリングと下地基板の安定なショットキー接合を実現することが可能になる。

【0043】 n 型半導体基板21表面に Au 等の金属材料からなるドレイン電極24を形成するが、当該ドレイン電極24は、 n 型半導体基板21とオーム性接続させる必要がある。オーム性接続を可能にするには、 n 型半導体基板表面に n^+ 領域を形成することが望ましい。 n^+

領域を形成しn型不純物層28を形成するには、通常、イオン注入法で行うが、このときn型半導体基板21表面近傍に高濃度の不純物濃度を維持するために、注入イオン種としてはAsが望ましい。また、このイオン注入量としては、カーボンナノチューブリング27をゲート電極として用いる本実施形態の場合においては、平均濃度として、 10^{18} cm^{-3} 以上のn型不純物濃度が望まれる。

【0044】不純物濃度を向上させるためには、メカノケミカルポリッシング法（研磨剤グランゾックス）等の公知の方法で、n型不純物層28が形成されたn型半導体基板21表面を研磨することが望ましい。このとき研磨量としては、表面を100nm～2μm程度研磨することが望ましく、200～500nm程度研磨することがより望ましい。

【0045】ドレイン電極24とn型半導体基板21との接合抵抗としては、1mΩ以上100kΩ以下であることが望ましく、1Ω以上50kΩ以下であることがより望ましく、100Ω以上10Ω以下であることがさらに望ましい。

【0046】ドレイン電極24の近傍かつ離間された位置に、電気的に独立したカーボンナノチューブリング27が固定され（載置され）、ゲート電極を構成するが、カーボンナノチューブリング27としては、本実施形態のようにp型半導体特性を有するものとするのが望ましいが、導電性を有するものであってもよい。

【0047】カーボンナノチューブリング27とドレイン電極24とは、近傍であって、かつ離間されることが必須であるが、具体的な両者の間隙としては、1nm～50μm程度であることが望ましく、5～200nm程度であることがより望ましい。

【0048】ゲート電極である当該カーボンナノチューブリング27には、既述の如く多重壁カーボンナノチューブ26の一端が接続され、他端はゲート電極端子25と接続されている。なお、本実施形態において、カーボンナノチューブリング27とゲート電極端子25との間の配線に導電性を有する多重壁カーボンナノチューブを用いているが、金等の金属配線を用いてもよい。ただし、本実施形態のように多重壁カーボンナノチューブを用いることで、カーボンナノチューブリング27とのトンネル接合により、低接触抵抗の電極配線を実現することができる。

【0049】既述の如く、多重壁カーボンナノチューブ29の一端が、n型半導体基板21表面の、カーボンナノチューブリング27の開口部から表出する部位にオーム性接続され、ソース電極22を構成し、他端は、ソース電極端子23と接続されている。なお、本実施形態において、ソース電極22とソース電極端子23との配線（接続配線）に導電性を有する多重壁カーボンナノチューブを用いているが、金等の金属配線を用いてもよい。

【0050】また、ソース電極22とn型半導体基板21との接合抵抗としては、1mΩ以上100kΩ以下であることが望ましく、1Ω以上50kΩ以下であることがより望ましく、100Ω以上10Ω以下であることがさらに望ましい。

【0051】本実施形態のトランジスタでは、ソース電極端子23とドレイン電極24との間に流れる電流もしくは電圧を、ゲート電極であるカーボンナノチューブリング27にかける電位を変化させることで、制御することが可能になる。すなわち、高速動作が可能で、室温で動作するナノメートルサイズのトランジスタとなる。

【0052】本実施形態において用いるカーボンナノチューブリング27および多重壁カーボンナノチューブ26、29の好ましい態様（大きさ、両者が接続される場合の接触抵抗等）は、第1の実施形態で説明したカーボンナノチューブリング17および多重壁カーボンナノチューブ16、16'と同様であるため、その詳細な説明は省略する。

【0053】なお、本実施形態のトランジスタの態様で、下地基板として、シリコンと酸化シリコンより構成されるSOI（Semiconductor on insulator）基板を用いることは、さらに望ましい。このとき、ケミカルメカノポリッシング法とエッチングを併用させることで、表面の半導体層の厚さを約50nmにまで加工することが好ましい。さらに、酸化シリコン基板表面に化学気相法等多結晶シリコン層を形成させ、n型不純物を導入した基板を用いることも可能である。このとき、アニール法等により多結晶シリコン層の結晶粒径をカーボンナノチューブリングのリング外径より大きな1μm以上に再成長させることで、移動度の低下を防ぐことが可能になる。

【0054】＜第3の実施形態＞図3は、本発明のトランジスタの第3の実施形態を示す模式斜視図である。本実施形態は、半導体特性を有するカーボンナノチューブリングを半導体材料として用いた例である。

【0055】図3に示すように本実施形態のトランジスタは、ゲート電極（制御電極）18が、酸化シリコン膜（絶縁性薄膜）12表面のカーボンナノチューブリング17の近傍かつ離間された位置に設けられている態様である。その他、n型シリコン基板11、酸化シリコン膜12、ソース電極端子13、ドレイン電極端子14、多重壁カーボンナノチューブ16、16'、カーボンナノチューブリング17は、第1の実施形態と同様の構成であり、同様に配置される。

【0056】すなわち、本実施形態のトランジスタは、ゲート電極がn型シリコン基板11の背面ではなく、酸化シリコン膜（絶縁性薄膜）12表面のカーボンナノチューブリング17の近傍かつ離間された位置に設けられていることを除き、その好ましい態様を含め第1の実施形態と同様であり、図3において、第1の実施形態と同

一の機能を有する部材には図1と同一の符号を付し、その詳細な説明は省略する。

【0057】カーボンナノチューブリング17とゲート電極18とは、近傍であって、かつ離隔されることが必須であるが、具体的な両者の間隔としては、1 nm～500 nm程度であることが望ましく、5～200 nm程度であることがより望ましく、10 nm前後であることが特に望ましい。

【0058】ゲート電極18は、金属配線でも導電性を有するカーボンナノチューブ（例えば多重壁カーボンナノチューブ）でも構わない。ゲート電極18には、接続配線19の一端が接続され、接続配線19の他端は、金等の金属材料からなるゲート電極端子30に接続される。接続配線19も、金属配線および導電性を有するカーボンナノチューブのいずれでも構わないが、ゲート電極18と同一の材料を用いることが望ましい。

【0059】本実施形態のトランジスタでは、ソース電極端子13とドレイン電極端子14との間に流れる電流もしくは電圧を、ゲート電極18の電位を変化させて制御することが可能になる。すなわち、高速動作が可能で、室温で動作するナノメートルサイズのトランジスタとなる。

【0060】なお、本実施形態では、基板として第1の実施形態と同様、n型シリコン基板11に絶縁性の酸化シリコン膜12を形成したものをを用いたが、カーボンナノチューブリング17が載置される面が絶縁性を有するものであれば、如何なる材料を用いることもできる（後述の第4の実施形態においても同様）。すなわち、基板そのものが絶縁性を有するものであってもよいし、本実施形態のように絶縁性、導電性を問わず任意の基体に、絶縁性薄膜を設けたものであってもよく、本発明において、これらの基板全てが「絶縁性基板」の概念に含まれる。

【0061】＜第4の実施形態＞図4は、本発明のトランジスタの第4の実施形態を示す模式斜視図である。本実施形態は、半導体特性を有するカーボンナノチューブリングを半導体材料として用いた例である。

【0062】図4に示すように本実施形態のトランジスタは、ゲート電極（制御電極）31が、酸化シリコン膜（絶縁性薄膜）12表面に載置されたカーボンナノチューブリング17のさらに上部に設けられている態様である。なお、ここでいう「上部」とは、地表面を基準とした上下関係を表すものではなく、酸化シリコン膜（絶縁性薄膜）12を基準にした場合におけるカーボンナノチューブリング17のさらに上部を意味するものとし、地表面を基準とした上下関係が逆転等していても全く問題ない。

【0063】その他、n型シリコン基板11、酸化シリコン膜12、ソース電極端子13、ドレイン電極端子14、多重壁カーボンナノチューブ16、16'、カーボ

ンナノチューブリング17は、第1の実施形態と同様の構成であり、同様に配置される。

【0064】カーボンナノチューブリング17のさらに上部に設けられるゲート電極31としては、数nm幅の貴金属極細線（AuやPt等）を適用することも可能であるが、導電性を有するカーボンナノチューブを用いるのが好ましい。導電性を有するカーボンナノチューブとしては、単一壁カーボンナノチューブおよび多重壁カーボンナノチューブの両者が適用可能である。

【0065】ゲート電極31には、接続配線32の一端が接続され、接続配線32の他端は、金等の金属材料からなるゲート電極端子33に接続される。接続配線32も、金属配線および導電性を有するカーボンナノチューブのいずれでも構わないが、ゲート電極31と同一の材料を用いることが望ましい。

【0066】本実施形態のトランジスタでは、ソース電極端子13とドレイン電極端子14との間に流れる電流もしくは電圧を、ゲート電極31の電位を変化させて制御することが可能になる。すなわち、高速動作が可能で、室温で動作するナノメートルサイズのトランジスタとなる。

【0067】ゲート電極31として導電性を有するカーボンナノチューブを用いた場合、ゲート電極31と、半導体特性を有するカーボンナノチューブリング17との接続は、ショットキー接続になり、この場合、ショットキー型電界効果トランジスタを形成することができる。

【0068】以上、本発明のトランジスタを4つの実施形態を挙げて詳細に説明したが、本発明はこれらに限定されるものではなく、既述の本発明の原理が応用され得る構成であれば、如何なる構成をも採用することができる。

【0069】

【実施例】以下に本発明の実施例を示すが、本発明はこれらの例に制限されるものではない。

（実施例1）アーク放電法で作製した単一壁カーボンナノチューブを超音波処理することで、カーボンナノチューブリングを作製した。具体的には、界面活性剤（和光純薬製、塩化ベンザルコニウム）のメタノール溶液（界面活性剤濃度5%）100 mlに単一壁カーボンナノチューブを50 mg分散させ、超音波処理（周波数20 kHz、出力50 W）を約1時間行った。その後、遠心分離法で約30分間、遠心分離処理した。液中に分散されているカーボンナノチューブリングをフィルターで回収後、フィルター上でメタノールとアセトンにより洗浄した。得られたカーボンナノチューブリングのリング外径は約20 nmから50 nm、チューブ部位の太さは2 nmから30 nmであった。なお、本実施例では、リング外径約50 nm、チューブ部位の太さ5 nmのp型半導体特性を有するものを用いた。

【0070】得られたカーボンナノチューブリングを用いて、以下のようにして図1に示すトランジスタを作製した。下地基板としては、(111)面のn型シリコン基板11を用いた。まず、表面を洗剤洗浄後、純水でリンスし、イソプロピルアルコール蒸気で処理し、乾燥させた。その後、n型シリコン基板11の片面(裏面)にAuを蒸着し、ゲート電極端子15を配置した。さらに、プラズマCVD法で50nmの酸化シリコン膜12を成長させ、その上に、減圧CVD法で多結晶シリコン層を形成させた。次に、n型シリコン基板11の表面にイオン注入法でAsをドーパ(イオン注入加速エネルギー40keV、イオン注入量約 $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$)し、ラピッドアニーリング法(ピーク温度約1200℃)で結晶回復させた。次に、表面の酸化膜除去と表面を安定させるために、HFで処理し、n型シリコン基板11表面のダングリングボンドをHで末端処理した。一般に、S1(111)面をHで末端処理すると、安定なSi-H₂が形成されるので、大気中でも、シリコン基板表面が酸化されにくくなる。

【0071】この状態で、n型シリコン基板11表面の酸化シリコン膜12の上に、メタノールに分散された前記カーボンナノチューブリングをスピンコート法で展開し、カーボンナノチューブリング17を載置した。次いで、カーボンナノチューブリング17の両端に、多重壁カーボンナノチューブ16、16'(直径約15nm)を接続し、かつ多重壁カーボンナノチューブ16、16'の他端がソース電極端子13およびドレイン電極端子14と接続するように配線した。多重壁カーボンナノチューブ16、16'の配線には、2つのピエゾアクチュエータをもつ走査型プローブ顕微鏡(SPM)を用い、プローブとして多重壁カーボンナノチューブを用いた。

【0072】このようにして得られた実施例1のトランジスタについて、n型シリコン基板11より構成されるゲート電極の電位を変化させることで、カーボンナノチューブリング17のソース電極およびドレイン電極間の電流電圧特性に変化が現れることを確認した。すなわち、ゲート電極端子15の電位(V_g)を0V~5Vの間1V刻みで変化させて、ソース電極端子13とドレイン電極端子14との間の電流電圧特性を、KEITHLEY社製エレクトロメーター6514を用いることにより測定した。なお、測定は室温(23℃)中で行った。その結果を図5に示す。

【0073】(実施例2)実施例1において得られたカーボンナノチューブリングを用いて、以下のようにして図2に示すトランジスタを作製した。実施例1と同様の(111)面のn型半導体基板21を用意し、表面にイオン注入法でAsを注入し、n⁺領域のn型不純物層28を形成した。As濃度を表面で最も高くするために、メカノケミカルポリッシング法(研磨剤グランゾック

ス)で、表面を300nm程度研磨した。

【0074】次に、表面にスパッタリング法でAuを部分的に蒸着し、オーム性接続されたドレイン電極24電極を形成した。さらに、実施例1と同様に、n型半導体基板21表面をH末端処理処理することで安定化させた。

【0075】この状態で、n型シリコン基板11表面のn型不純物層28の上に、メタノールに分散された前記カーボンナノチューブリングをスピンコート法で展開し、カーボンナノチューブリング27を載置した。このときのカーボンナノチューブリング27は、リング外径約50nm、チューブ部位の太さ8nmの導電性を有するものを用いた。

【0076】実施例1と同様に、2つのピエゾアクチュエータをもつ走査型プローブ顕微鏡(SPM)を用い、プローブとして多重壁カーボンナノチューブ(直径約15nm)を使用し、配線した。まず、カーボンナノチューブリング27およびゲート電極端子25に、SPMの第一プローブで多重壁カーボンナノチューブ26を接続し、次に、第二プローブで多重壁カーボンナノチューブ29をカーボンナノチューブリング27の開口部から表出する部位のn型半導体基板21の表面、および、ソース電極端子23に接続した。このようにして、実施例2のトランジスタを作製した。

【0077】このようにして得られた実施例2のトランジスタについて、カーボンナノチューブリング27より構成されるゲート電極の電位を変化させることで、ソース電極22およびドレイン電極24間の電流電圧特性に変化が現れることを確認した。すなわち、ゲート電極端子25の電位(V_g)を0V~5Vの間1V刻みで変化させて、ソース電極端子23とドレイン電極24との間の電流電圧特性を、KEITHLEY社製エレクトロメーター6514を用いることにより測定した。その結果を図6に示す。

【0078】

【発明の効果】本発明のトランジスタによれば、カーボンカーボンナノチューブを利用したナノメーターサイズの微小で高速動作可能な室温で動作するスイッチング素子を実現でき、工業的有用性は極めて高い。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明のトランジスタの第1の実施形態を示す模式斜視図である。

【図2】 本発明のトランジスタの第2の実施形態を示す模式斜視図である。

【図3】 本発明のトランジスタの第3の実施形態を示す模式斜視図である。

【図4】 本発明のトランジスタの第4の実施形態を示す模式斜視図である。

【図5】 本発明の実施例のトランジスタにおけるソース電極およびドレイン電極間の電流電圧特性である。

【図6】 本発明の他の実施例のトランジスタにおけるソース電極およびドレイン電極間の電流電圧特性である。

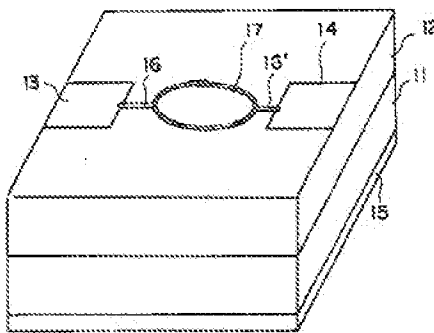
【符号の説明】

11 n型シリコン基板
12 酸化シリコン膜
13、23 ソース電極端子
14 ドレイン電極端子
15、25、30、33 ゲート電極端子
16、16'、26、29 多重壁カーボンナノチューブ

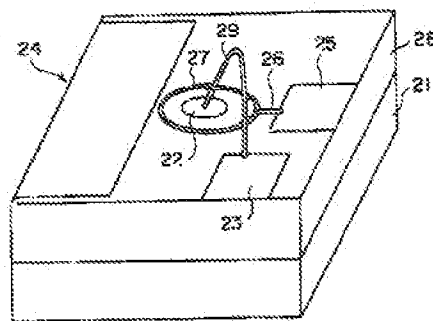
ブ

17、27 カーボンナノチューブリング
18、31 ゲート電極
19 接続配線
21 n型半導体基板
22 ソース電極
24 ドレイン電極
28 n型不純物層
32 接続配線

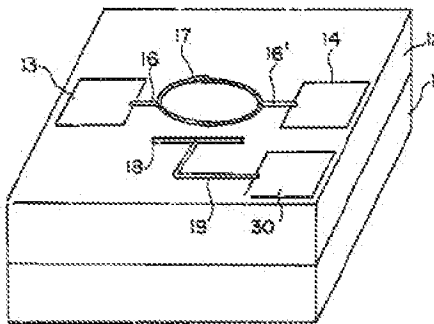
【図1】



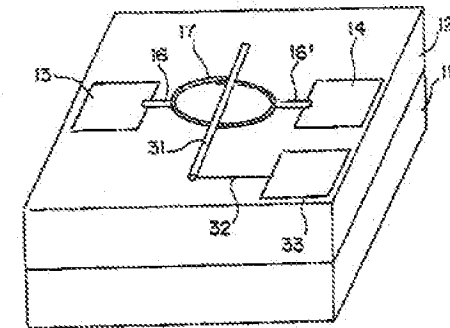
【図2】



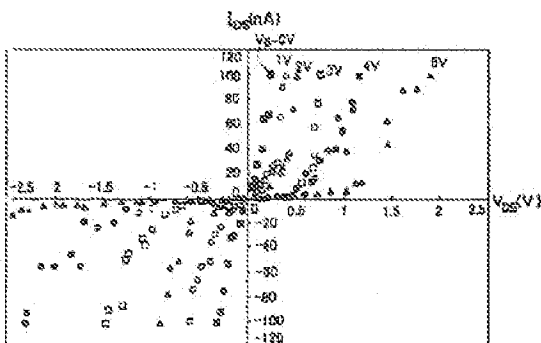
【図3】



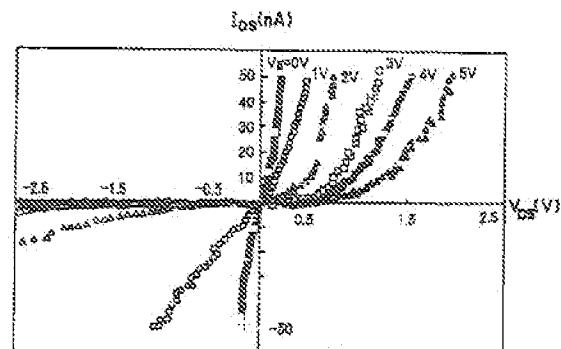
【図4】



【図5】



【図6】



フロントページの続き

(51) Int. Cl. ⁷	識別記号	F 1	(参考)
H 0 1 L	29/786	H 0 1 L 29/78	6 1 8 B
	21/338		6 2 2
	29/812	29/80	B
	21/337		C
	29/808		

(72) 発明者 真鍋 力	F ターム(参考)	4M104 AA01 AA04 AA05 AA10 BB01
神奈川県南足柄市竹松1600番地 富士ゼロ		BB36 CC01 CC03 CC05 FF13
ックス株式会社内		GG09 GG12
		5F040 DC01 EC04 EC16 EC19 EC26
		EE01 EF01 EH02
		5F102 FR10 GB01 GC01 GD01 GD04
		GJ03 GJ05 GL02 GL10 GR01
		GS03 GS07 GT01 HC01 HC11
		5F110 AA01 CC10 DD05 DD13 EE01
		EE22 EE36 GG01 GG22 GG23